

## LH 전송선을 이용한 광대역 고역통과 필터 설계 및 제작

양두영<sup>1\*</sup> · 서수덕<sup>2</sup> · 조학래<sup>2</sup>

### Design and Fabrication of Wideband High Pass Filter Using Left-Handed Transmission Line

Doo-Yeong Yang<sup>1\*</sup> · Soo-Duk Seo<sup>2</sup> · Hak-Rae Cho<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Telecommunication Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

<sup>2</sup>Innertron Inc., Incheon, 654-321, Korea

#### 요 약

본 논문에서는 칩캐시터와 마이크로스트립 선로를 이용하여 LH 구조의 단위셀을 고안하고, 제안된 단위셀로부터 등가회로를 추출하여 단위셀의 제반 특성을 분석하였으며, 광대역 고역통과필터를 설계하는데 적용하였다. 이 필터는 고역통과 특성을 갖는 여러 개의 단위셀을 종속 연결하여 마이크로스트립 전송선에 구현하였으며, 그 성능은 0~2.18 GHz의 저지대역에서 62.9dB의 대역제거 특성과 3.0~12.75 GHz의 통과대역에서 1.17dB 이하의 삽입손실을 갖는다.

#### ABSTRACT

In this paper, the unit cell of LH structure using microstrip transmission line and chip capacitor is devised, and the reactive components of equivalent circuit are extracted from the proposed unit cell. And then, we have analyzed for the unit cell parameters and applied the characteristics to the wideband high pass filter design. This filter cascading several unit cells with high pass property has been implemented on microstrip transmission line, and the performance has been the band rejection characteristics of 62.9 dB in the stop band to 0~2.18 GHz and less than the insertion loss of 1.17 dB in the pass band from 3.0 GHz to 12.75 GHz.

**키워드** : LH 구조, 마이크로스트립 전송선, 광대역 고역통과 필터

**Key word** : Unit Cell, LH Structure, Microstrip Transmission Line, Wideband High Pass Filter

접수일자 : 2013. 10. 16 심사완료일자 : 2013. 12. 02 게재확정일자 : 2013. 12. 20

\* **Corresponding Author** Doo-Yeong Yang(E-mail:yeongyd@jejunu.ac.kr, Tel:+82-64-754-3636)

Department of Telecommunication Engineering, Jeju National University, Jeju 690-756, Korea

**Open Access** <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2014.18.2.260>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.  
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

## I. 서 론

메타물질은 특수한 전자기적 성질을 갖는 이상적으로 균질한 구조로서 자연계에는 존재하지 않은 인공적인 물질이다. LHM (Left-Handed Metamaterials)은 대표적인 메타물질이며, 이에 대한 최초의 연구는 1967년 러시아 과학자에 의해 발표되었다. 논문에서 Viktor Veselago는 LHM의 존재 가능성과 LHM이 스넬(Snell)의 법칙, 도플러(Doppler) 효과, 그리고 체렌코프(Cerenkov) 방사 등 기존의 물리법칙과 반대로 되는 현상을 예측하였다. 그리고 LHM 내에서는 전계, 자계와 전파 벡터의 방향이 기존 물질과는 역으로 형성됨을 보여주었다. 결국 LHM 내에서는 전자파의 군속도와 위상속도의 진행방향이 서로 반대 방향을 이루는 후진파를 형성하게 된다. 따라서 에너지는 소스에서 멀리 이동하지만 음의 굴절율로 인하여 전자파는 에너지 전달 방향과 반대 방향으로 이동한다[1]. Veselago는 LHM의 존재를 예측했지만, 실험적인 인 증은 30여년 후에야 D. R. Smith와 J. B. Pendry에 의해 주기적인 금속 도체 구조와 분할 링 공진기(Split Ring Resonator)를 2차원 공간에 배열하여 LHM의 특성을 실험적으로 입증하였다[2]. 그 이후 선형 다이폴 구조와 SRR을 조합한 방식, 또는 그 변형 구조가 LHM의 실제적인 구현에 많이 이용되었다. 이들은 기본적으로 공진현상에 기반을 둔 구조이기 때문에 좁은 대역폭과 큰 손실 등의 문제점으로 마이크로파 대역에 널리 활용되지 못했다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 메타물질의 전송선 접근법에 대한 여러 가지 연구들이 이루어졌다. 그 중에 T. Itoh와 C. Caloz는 기존 전송선의 등가회로에 쌍대성 원리를 이용한 LH 전송선을 발표하였다[3].

마이크로스트립 LH 메타물질 전송선로는 주파수 선택성이 높으며 손실이 낮을 뿐 아니라 대역폭이 넓으면서도 집적회로를 구성하기 쉽다는 장점이 있다. 그래서 마이크로파시스템을 설계함에 있어서 소형화, 저비용, 그리고 저전력 손실 등이 요구되는 경우에 LH 전송선로가 많이 사용되고 있다. 그러나 순수한 PLH (Purely LH) 구조는 전송선이 내포하고 있는 기생효과로 인하여 실제로 존재하기 어렵기 때문에 복합구조인 “C-CRLH (Conventional Composite Right and Left-Handed)”의 개념을 도입하고 있다[4-6]. C-CRLH 모델[4]은 LH(LL, CL) 성분과 RH(LR, CR) 성분을 동시에 가지고 있다.

C-CRLH 구조를 이용하여 RH 성분과 LH 성분을 조절하면서 저역통과필터(LPF), 고역통과필터(HPF), 대역통과필터(BPF), 그리고 대역저지필터(BRF)를 설계할 수 있다[7-13].

본 논문에서는 초고주파대역에서 필터를 설계하기 위하여 LH 메타 단위셀에 대한 연구를 수행하고, 마이크로스트립 선로로 구성된 메타셀 구조를 칩소자와 집적화하여 특성이 우수하면서도 소형화된 필터를 개발한다. 메타셀 구조를 갖는 소형화된 필터를 구성함에 있어서 C-CRLH 회로구조의 마이크로스트립 전송선로를 이용하여 LH 성질이 우수한 고역통과 특성의 단위셀을 고안한다. 그리고 메타 단위셀의 특성을 분석한 후, 그에 대한 등가회로를 추출하고 고역통과필터 회로를 구성하기 위한 방법을 모색한다. 그 결과를 토대로 광대역 특성을 갖는 고역통과필터를 설계하고 제작하여 설계기준 규정에 따른 제반 사항들을 고찰한다.

## II. 마이크로스트립 전송선을 이용한 LH 메타 단위셀 고안

균질인 C-CRLH 전송선은 자연에 존재하지 않는다. 그러나 특정주파수 범위에서는 관내파장이 전송선의 길이에 비해 매우 길어 전자기파의 연속성의 조건을 만족시킬 경우, 실제로 균질한 C-CRLH 전송선으로 표현될 수 있다. C-CRLH 마이크로스트립 선로 구조는 제조가 단순하여 능동과 수동소자들을 직렬이나 병렬로 쉽게 연결할 수 있고, 회로의 사이즈를 줄일 수 있다.

그림 1과 그림 2는 균질한 전송선로에 대한 RLC 기반의 분포정수 C-CRLH 단위셀과 등가회로를 표현한 그림이다. 단위셀은  $\Delta z$ 의 길이를 갖는 신호전송선, 신호전송선 사이에 직렬로 놓인 2개의 커패시터 그리고 병렬 단락스터브 전송선으로 구성되고, 단위셀의 물리적 미소 길이가 아주 짧은 길이를 가지면 무차원 단위셀이 된다. 물리적인 미소 길이  $\Delta z$ 는 구현하는 커패시터와 단락스터브, 그리고 이들을 연결하는 신호전송선의 길이에 따라 결정된다.

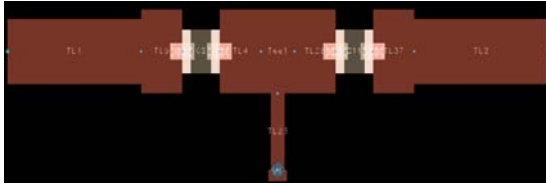


그림 1. RLC 기반 마이크로스트립 단위셀  
Fig. 1 RLC based microstrip unit-cell

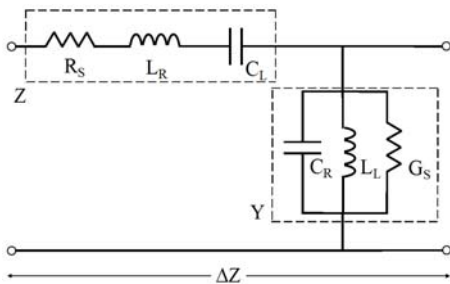


그림 2. RLC 기반 마이크로스트립 단 위셀 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit RLC based microstrip unit-cell

마이크로스트립 전송선로 단위셀 구조가  $\Delta z \rightarrow 0$  조건을 만족할 때, 그림 1은 균질한 RLC 기반 C-CRLH 전송선 등가회로인 그림 2와 같이 나타낼 수 있다. 실제 설계에서 단위셀이 1/4배의 관내파장보다 작으면 RLC 기반의 균질한 전송선의 특성을 갖는다[3]. 여기서 단위셀을 설계함에 있어서 적용한 단위길이  $\Delta z$ 는  $0.147\lambda_g$  파장의 길이를 갖는다.

RLC 기반 단위셀에서 Bloch-Floquet [3] 이론에 관한 주기적인 경계 조건을 적용하면 RLC 기반 전송선의 위상정수는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\beta(\omega) = \frac{1}{\Delta z} \cos^{-1} \left( 1 + \frac{Z_c Y_c}{2} \right) \quad (1)$$

여기서  $Z_c(\omega) = R_s + j(\omega L_R - \frac{1}{\omega C_L})$ ,  $Y_c(\omega) = G_s + j(\omega C_R - \frac{1}{\omega L_L})$ ,  $L_R = L'_R \Delta z$ ,  $C_R = C'_R \Delta z$ ,  $L_L = L'_L / \Delta z$ ,  $C_L = C'_L / \Delta z$  이다.

단위셀의 전기적인 길이가 작기 때문에 Taylor 근사법  $\cos(\beta \Delta z) \approx 1 - (\beta \Delta z)^2 / 2$  를 적용하면 위상정수

공식은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$\beta(\omega) = \pm \frac{1}{\Delta z} \sqrt{R_e - j(R_s X_{sc} + G_s X_{sh})} \quad (2)$$

$$R_e = [R_s G_s - (\omega L_R - \frac{1}{\omega C_L})(\omega C_R - \frac{1}{\omega L_L})]$$

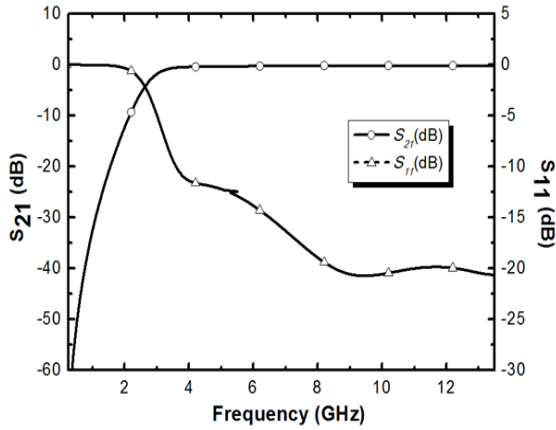
$$X_{sc} = (\omega C_R - \frac{1}{\omega L_L})$$

$$X_{sh} = (\omega L_R - \frac{1}{\omega C_L})$$

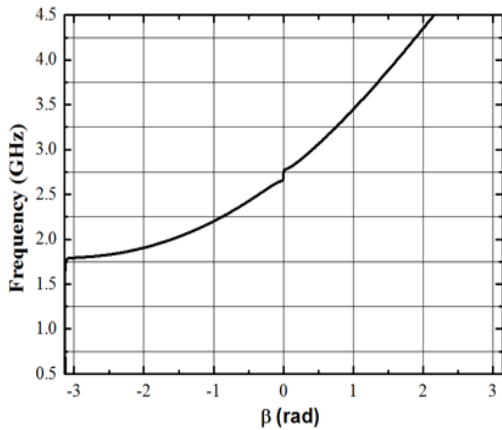
따라서 RLC 기반 C-CRLH 전송선은 작은 전기적인 길이를 가질 때 이상적으로 균질한 C-CRLH 전송선으로 생각할 수 있다. 일반적인 평형과 불평형 LC 기반의 C-CRLH 전송선의 분산 특성곡선은 문헌 [3]에 표현되어 있다.

그림 3의 (a)는 마이크로스트립 단위셀의 시뮬레이션 특성을 나타낸 것으로서 일반적인 C-CRLH 단위셀 [4-7] 보다 차단주파수대역의 스킵특성이 크며, 통과대역내의 평탄도도 양호하여 다단으로 종속 연결하여 필터를 구성하면 설계하고자 하는 스펙규정을 만족시키기 적합하다. 이러한 현상은 C-CRLH 단위셀을 구성할 때 칩커패시터를 사용함으로써, 단지 전송선로만으로 단위셀을 구성할 때 나타나는 분포정수에 따른 기생효과와 커플링효과를 제거하여 정확한 LH 회로소자 값을 형성할 수 있기 때문이다. 특히 분포정수 회로의 기생효과와 커플링효과는 직렬 커패시턴스(CL)에 커다란 영향을 미친다. 그러므로 이러한 현상을 극복하고 필터회로를 소형화하기 위해서는 병렬인덕턴스 성분은 단락 스티브를 이용하여 구현하고, 단지 직렬커패시턴스 성분만 칩커패시터로 대체하면 더욱 성능이 양호한 고역통과필터 회로를 설계할 수 있다. 그림 3의 (b)는 차단대역과 통과대역에서 나타나는 위상정수에 대한 분산 다이어그램(dispersion diagram)이다. 분산 다이어그램은 유전상수가 2.5인 마이크로스트립 기판에 칩커패시터를  $0.147\lambda_g$ 의 미소길이 전송선 사이에 직렬로 연결하고, 병렬로  $0.036\lambda_g$ 의 단락스티브를 접지면과 연결하여 단위셀을 구성하였을 때, 회로에 나타나는 등가소자 성분들을 위상정수 식 (2)에 적용하여 시뮬레이션한 결과이다. 이 때, 등가회로의 임피던스 성분은  $R_s=0.0051\Omega$ ,  $L_R=0.15nH$ ,  $C_L=1.1pF$  이고, 병렬 어드미

턴스 성분은  $G_s=0.005\Omega$ ,  $L_L=2.5nH$ ,  $C_R=0.015pF$  값을 갖는다.



(a)



(b)

그림 3. 마이크로스트립 단위셀의 시뮬레이션 특성 (a) S-파라미터, (b) 분산 다이어그램

Fig. 3 Simulation characteristics of RLC based microstrip unit-cell (a) S-parameters, (b) dispersion diagram

그림에서 2.75GHz 이하의 차단주파수에서는 위상정수 값이 음의 값을 가지므로 LH 특성이 나타나고, 그 이상의 주파수인 통과대역에서는 양의 값을 가지게 되므로 RH 특성이 나타난다. 이상적인 고역통과필터 회로인 경우에는 PLH(Purely LH) 특성을 가지지만 일반적인 고역통과필터 회로에서는 차단주파수 이하에서만 LH 특성이 나타나게 된다.

이러한 방법으로 그림 4처럼 회로를 다단 종속 연결하여 구성하면 C-CRLH 모델의 단위셀로부터 양호한 LH 특성을 갖는 마이크로스트립 고역통과필터를 구성할 수 있다.

### III. 마이크로스트립 고역통과필터의 시뮬레이션 특성

그림 4는 LH 특성을 갖는 마이크로스트립 단위셀을 다단 종속 연결하여 구성된 마이크로스트립 고역통과필터이다. 우선 통과대역 리플이 0.1 dB인 5단으로 구성된 11차 체비셰프 원형필터[8,9]의 소자 값 ( $C_L$ ,  $L_L$ ) 으로부터 주파수 대역을 고역통과로 변환한 다음 고역통과필터 회로를 구성한다. 이 때, 필터회로 각 단의 직렬 임피던스는 짧은 전송선 길이를 갖는 무손실 전송선을 이용하여 구현하기 때문에  $R_s$  와  $L_R$  성분은 거의 무시할 수 있으므로, 전송선 양단 사이에 칩커패시터를 연결하여  $C_L$  성분을 구현하면 된다. 또한 병렬어드미턴스는 폭이 좁은 마이크로스트립 선로를 병렬로 접지단과 연결하여 무손실 단락 스티브를 구성하면  $G_s$  와  $C_R$  성분은 무시되고  $L_L$  성분만 구현된다. 이와 같은 방법으로 주파수 변환된 각 단의 소자 값을 사다리 형태로 구성하면 차단주파수 이상의 신호는 잘 통과시키고, 저지대역의 스킨트 특성은 커진다. 그리고 각 단의  $L_R$  성분과  $C_R$  성분이 나타나지 않도록 마이크로스트립 라인의 폭과 길이를 적절히 조정하면 통과대역이 넓어지고 반사손실 특성이 줄어든다.

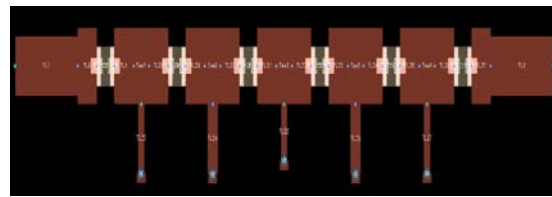


그림 4. 마이크로스트립 고역통과필터 레이아웃 패턴 (43mmx8mm)

Fig. 4 Layout pattern of microstrip high pass filter (43mm x8mm)

전체 길이가  $0.62\lambda_g$ 의 작은 크기(43mmx8mm)로 설계된 그림 4에 대한 마이크로스트립 고역통과필터의 시

물레이션 결과는 그림 5와 같이 나타난다. 그림을 보면 통과대역은 3.0 GHz에서 14 GHz 범위에서 형성되며, 통과대역내의  $S_{21}$ [dB]의 리플은 0.5 dB, 반사손실  $S_{11}$ [dB]은 -15 dB 이하, 그리고 2.0 GHz의 차단대역에서  $S_{21}$ [dB]의 스킨트 특성은 -80 dB 이하로 양호한 특성을 갖는다.

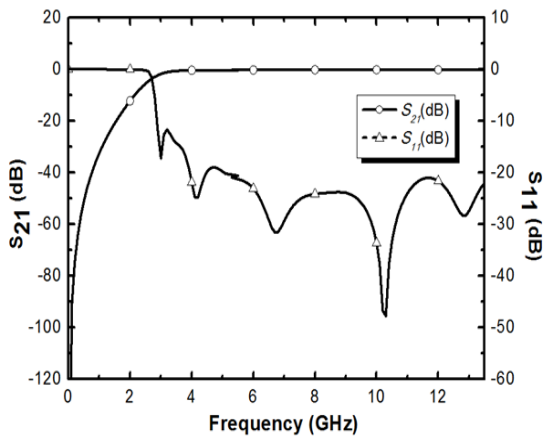


그림 5. 마이크로스트립 고역통과필터의 시뮬레이션 특성  
**Fig. 5** Simulation characteristics of microstrip high pass filter

#### IV. 제작 및 측정 결과

그림 6은 시뮬레이션 결과를 토대로 도출된 최적화 고역통과필터의 제원을 가지고, 타코닉에서 만든 마이크로스트립 기판을 사용하여 감광, 에칭, 도금, 조립과정을 거쳐 5단 마이크로스트립 고역통과필터를 제작한 후, 벡터네트워크분석기(Vector Network Analyzer)를 사용하여 1 GHz ~ 13.5 GHz의 광대역 주파수 범위까지 20W 전력의 스위프 신호를 인가하여 입력신호의 전달 특성과 반사특성인 정재파비(Standing Wave Ratio)를 측정하였다. 제작된 필터의 온도 변화에 따른 안정성 보장을 확보하기 위하여 측정온도를 +25°C, -30°C, +65°C인 3단계로 변화를 주면서 측정하였다. 우선, +25°C에서 피측정 대상인 제작된 필터를 측정 장비에 연결한 후 30분 동안 가동시키고, 그 다음 30분 동안은 온도를 +25°C에서 -30°C로 낮추고 나서 1시간 동안 지속적으로 가동한 다음 -30°C에서의 측정값을 얻는다.

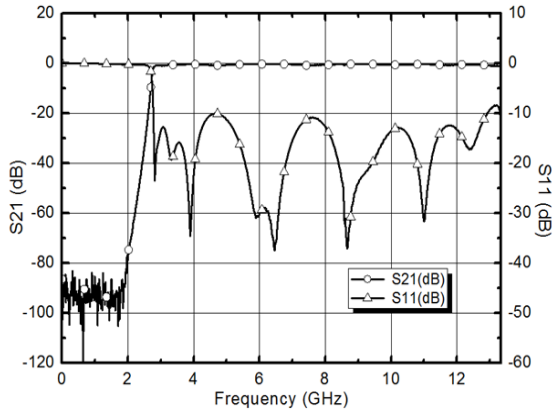
그리고 다시 -30°C에서 +25°C로 온도를 올리고 30분 동안 가동시킨 후에 다시 +65°C로 올려 1시간 동안 동작시키고 +65°C에서의 측정값을 얻는다. 그리고 나서 마지막으로 측정온도를 +65°C에서 +25°C로 내리고 30분 동안 동작시킨 다음 +25°C에서의 측정값을 얻는다. 온도를 올리고 내릴 때마다 달라지는 온도차이 때문에 발생하는 문제점을 미연에 방지하기 위하여 30분 동안 천이 시간을 갖는다.

그림 6(a)는 제작한 시작품을 가지고, +25°C에서 측정한 고역통과필터의 전달특성인  $S_{21}$ [dB]과 반사특성인  $S_{11}$ [dB]를 표현한 특성 그래프이다. 측정된 필터의 삽입손실 특성인  $S_{21}$ [dB]은 3.0 GHz ~ 12.75 GHz의 통과대역인 3.1 GHz, 3.43 GHz 주파수에서 -0.64 dB, -1.025 dB이고, 저지대역인 2.18 GHz에서는 -62.67 dB로 측정되어, -1.05 dB 이하인 양호한 삽입손실과 -62 dB 이하의 우수한 스킨트 특성을 보였다. 그리고 입력과 출력 정재파비 특성은 통과대역인 3.0 GHz, 3.54 GHz에서 1.52, 1.94로 측정되어 2 이하의 제품 규격을 만족하였다.

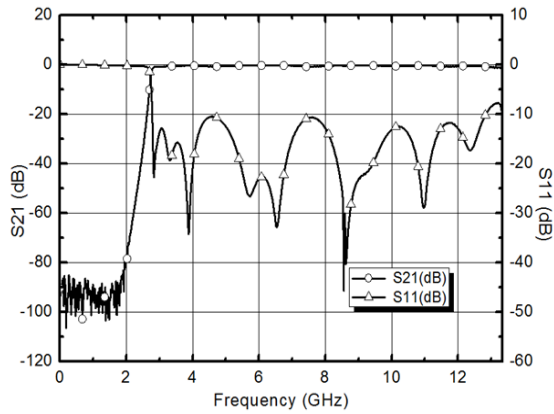
그림 6(b)는 -30°C에서 측정한 고역통과필터의 특성으로써, 삽입손실  $S_{21}$ [dB]은 동일한 측정 주파수인 통과대역과 저지대역에서 -0.835 dB, -1.068 dB, -64.68 dB로 측정되어 우수한 성능을 나타내었다. 그리고 입력과 출력 정재파비는 1.47, 1.85로 측정되어 2 이하의 제품 규격을 만족하였다. 특히, 온도가 +25°C에서 -30°C로 내려감에 따라 통과대역내의 삽입손실은 0.043 dB 커지고 저지대역내의 스킨트 특성은 2.0 dB 증가하였다.

그림 6(c)는 -30°C에서 측정한 이 필터의 특성이다. 삽입손실  $S_{21}$ [dB]은 측정 주파수인 통과대역과 저지대역에서 -1.16 dB, -1.169 dB, -64.46 dB로 측정되었다. 그리고 입력과 출력 정재파비는 1.53, 1.92로 측정되어 제품 규격을 만족하였다.

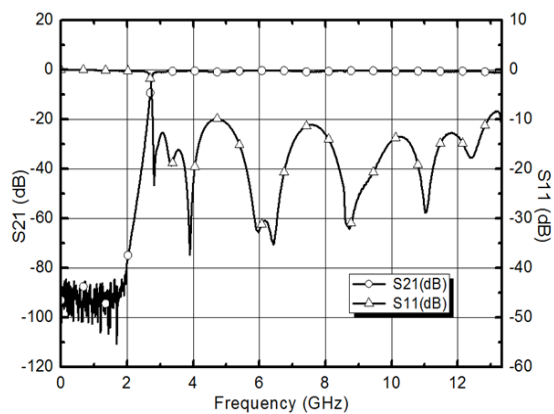
온도가 -30°C에서 +65°C로 올라감에 따라 삽입손실은 거의 달라지지 않고 스킨트 특성만 0.46 dB 정도 증가하였다. 따라서 그림 6에 나타난 이 필터의 제반 특성은 3.0 GHz ~ 12.75 GHz의 통과대역에서 삽입손실은 최대 1.17 dB이고, 정재파비는 2.0 이하로서 제품 규격을 만족한다. 그리고 DC ~ 2.18 GHz의 저지대역에서는 -60 dB 이하의 우수한 대역제거 성능을 갖는다.



(a)



(b)



(c)

**그림 6.** 마이크로스트립 고역통과필터의 측정결과 (a) 25°C의 측정결과, (b) -30°C의 측정결과, (c) 65°C의 측정결과  
**Fig. 6** Measured results of microstrip high pass filter (a) measured results at 25°C, (b) measured results at -30°C, (c) measured results at 65°C

**표 1.** 마이크로스트립 고역통과필터의 측정결과와 규격  
**Table. 1** Measured results and specification of microstrip high pass filter

Parameter	Spec.	HPF measured results			Judge
		+25	-30	+65	
Passband		3.0 - 12.75 GHz			
Insertion Loss	Max. 1.2dB	1.02	1.07	1.17	Pass
VSWR	2:1	1.94:1	1.85:1	1.92:1	Pass
Rejection Band		DC - 2.180 GHz			
Rejection	Min. 60dB	62.9	64.9	64.6	Pass



**그림 7.** 마이크로스트립 고역통과필터의 사진  
**Fig. 7** Photograph of microstrip high pass filter

그림 7은 설계된 회로에 따라 레이아웃패턴을 만들고 부품들을 조립한 후, 지그에 고정시켜 고역통과필터를 완성한 시작품 사진이고, 표 1은 측정된 결과를 정리하여 도표로 나타낸 규격이다. 따라서 이 필터의 성능은 통과대역 3.0 GHz ~ 12.75GHz, 저지대역 DC ~ 2.18 GHz, 최대 삽입손실 1.17 dB, 정재파비 1.94, 저지대역 감쇄 62.9 dB로써 -30°C ~ +65°C의 온도의 변화에도 스펙에서 정한 규격을 매우 잘 충족한다.

## V. 결론

본 논문에서는 LH 단위셀 구조를 통하여 얻어진 설계예원을 가지고 마이크로스트립 고역통과 필터의 시작품을 제작하고 측정하였으며, 그에 따른 제반 성능을 분석하였다.



측정 결과, 광대역특성을 갖는 마이크로스트립 고역 통과필터는 삽입손실, 정재파비, 저지대역 감쇄, 고전력 테스트에서 모두 우수한 성능으로 측정되었다. 이 고역통과필터는 삽입손실 1.08 dB, 정재파비 1.96, 저지대역 감쇄 61.4 dB, 전력테스트 20W에서 유효한 평가를 얻어 모든 면에서 스펙에서 정한 규정 값 이상을 만족하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2013년도 제주대학교 학술진흥연구비 지원사업에 의하여 연구되었습니다.

### REFERENCES

[ 1 ] V. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of  $\epsilon$  and  $\mu$ ," *Soviet Physics Uspekhi*, vol. 10, no. 4, pp. 509-514, Feb. 1968.

[ 2 ] D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. N. Nasser and S. Schultz, "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," *Physical Review Letter*, vol. 84, no. 18, pp. 4184-4187, May 2000.

[ 3 ] C. Caloz and T. Itoh, *Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications*, John Wiley & Sons, pp. 15, 2006.

[ 4 ] C. Caloz and T. Itoh, "Novel microwave devices and structures based on the transmission line approach of

meta-materials," *Microwave Symposium Digest, IEEE MTT-S International*, vol. 1, pp. 195-198, June 2003.

[ 5 ] A. Lai, T. Itoh and C. Caloz, "Composite right/left-handed transmission line metamaterials," *IEEE Microwave Magazine*, pp. 34-50, Sept. 2004.

[ 6 ] Q. Zhu and S. J. Xu, "Composite right/left handed transmission line metamaterials and applications," *Meta. 2008 International Workshop*, pp. 72-75, Nov. 2008.

[ 7 ] C. Caloz, "Dual composite right/left handed (D-CRLH) transmission line metamaterial," *IEEE Microwave Wireless Component Letter*, vol. 16, no. 11, pp. 585-587, Nov. 2006.

[ 8 ] G. L. Matthaei, L. Yeong and E. M. T. Jones, *Microwave Filters, Impedance-matching Networks and Coupling Structures*, Artech House Books, pp. 83-162, 1980.

[ 9 ] J. X. Chen and Q. Xue, "Compact microstrip low-pass filter using spiral resonant structure," *IEE Proc., Microwave, Antennas Propagation*, vol. 153, no. 5, Oct. 2006.

[10] T. Yasuzumi, T. Uwano and O. Hashimoto, "Microstrip high-pass filter with attenuation poles using cross-coupling," *IEEE 2010 Asia-Pacific Microwave Conference Proc., APMC 2010*, pp. 107-110, 2010.

[11] J. Selga, F. Aznar, A. Velez, M. Gil, J. Bonache and F. Martin, "Low-pass and high-pass microwave filters with transmission filter with transmission zero based on metamaterial concepts," *IEEE International Workshop on Antenna Technology, IWAT 2009*, pp. 1-4, 2009.

[12] L. Yang, S. D. Seo, H. R. Cho and D. Y. Yang, "Analysis of unit cells for filter design using CRLH transmission line," *ICCE2012 Proceeding*, pp. 397-401, Aug. 2012.

[13] F. F. He, K. Wu and W. Hong, "A wideband bandpass filter by integrating a section of high pass HMSIW with a microstrip lowpass filter," *IEEE Global Symposium on Millimeter Waves, GSMM 2008*, pp. 282-284, 2008.



양두영(Doo-Yeong Yang)

1984.2 : 제주대학교 통신공학과 졸업(공학사)  
 1989.2 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학석사)  
 1992.2 : 한양대학교 대학원 전자통신공학과 졸업(공학박사)  
 1992.2~현재 : 제주대학교 통신공학과 교수  
 2001.1~2002.8 : 유타주립대학교 연구교수  
 ※관심분야 : 위성통신 및 무선통신시스템, 마이크로파 회로 설계



**서수덕(Soo-Duk Seo)**

1996.2 : 제주대학교 통신공학과 졸업(공학사)  
1998.2 : 제주대학교 대학원 통신공학과 졸업(공학석사)  
1998.2~2005.7 : 에이스테크놀로지 선임연구원  
2007.1~현재 : 이너트론 연구소 소장  
※관심분야 : 무선통신시스템, 마이크로파 회로 설계



**조학래(Hak-Rae Cho)**

1999.2 : 경남대학교 재료공학과 졸업(공학사)  
2000.3~2000.12 : 에이스테크놀로지 대리  
2001.1~2002.2 : 이노웨이브 이사  
2002.2~현재 : 이너트론 대표이사  
※관심분야 : 무선 중계기 및 기지국 시스템